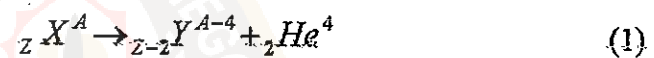


BAB II

DASAR TEORI

2.1. Radioaktivitas

Menurut Susetyo (1988), radioaktivitas adalah gejala perubahan keadaan inti atom secara spontan yang disertai radiasi berupa zarah dan atau gelombang elektromagnetik. Perubahan dalam inti atom menyebabkan perubahan dari satu nuklida menjadi nuklida yang lain atau dari satu unsur menjadi unsur yang lain. Peristiwa ini disebut sebagai disintegrasi inti atau peluruhan radioaktif. Agar gejala radioaktivitas dapat dinyatakan secara kuantitatif, ditinjau suatu peluruhan radioaktif sederhana sebagai berikut :



X meluruh menjadi Y yang stabil dengan memancarkan partikel- α .

Apabila cacah atom induk pada saat t adalah N_t , maka dapat ditulis (Wardhana, 1996) sebagai :

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t \quad (2)$$

dengan λ adalah tetapan radioaktif yang dinyatakan dalam dimensi T^{-1} (persatuan waktu).

Apabila persamaan (2) diintegrasikan, didapatkan :

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

dengan N_0 adalah cacah inti induk pada saat $t = 0$.

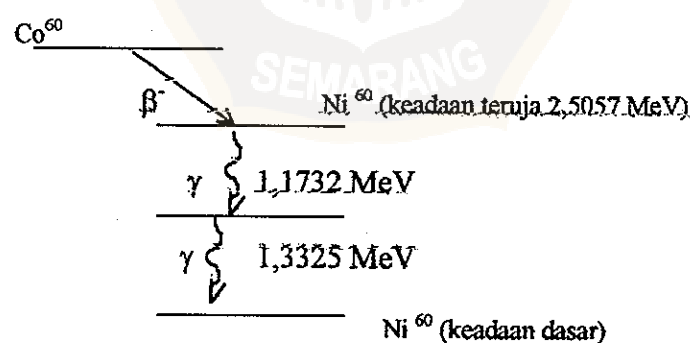
2.1.1. Radiasi- γ

Menurut Beiser (1991), setelah inti memancarkan zarah α , β^- , β^+ atau tangkapan elektron, atom tersebut akan berada dalam keadaan tereksitasi dan segera akan menuju ke keadaan dasar dengan jalan memancarkan radiasi elektromagnetik yang disebut sebagai sinar- γ . Sinar- γ dapat dipandang sebagai paket catu energi yang disebut foton- γ . Massa dan muatan suatu inti yang memancarkan sinar- γ tidak berubah.

Sebagai contoh suatu peluruhan- γ , pada Co^{60} yang meluruh menjadi Ni^{60} melalui peluruhan parikel- β^- sebagai berikut :



Ni^{60} yang terbentuk berada dalam keadaan tereksitasi (2,5057 MeV diatas keadaan dasarnya) segera meluruh dengan memancarkan dua sinar- γ masing-masing dengan energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV.



Gambar 2.1. Skema peluruhan partikel- γ Co^{60} (Susetyo, 1988)

Sinar- γ yang dipancarkan oleh inti atom dapat berinteraksi dengan salah satu elektron orbital dan elektron orbital akan terpental keluar.

Tempat kosong yang ditinggalkan elektron yang terpenyal akan diisi oleh elektron dari kulit yang lebih luar. Perpindahan orbit elektron ini akan disertai dengan pancaran sinar-x. Peristiwa ini dinamakan konversi internal dan elektron yang dipancarkan keluar dinamakan elektron konversi. Besarnya energi gerak elektron konversi tersebut sebesar energi sinar- γ dikurangi energi ikat elektron. Konversi internal pada umumnya terjadi pada radioisotop pemancar radiasi- γ lemah. Dalam suatu peluruhan, sinar- γ yang dihasilkan tidak seluruhnya mengalami konversi internal karena sebagian yang lain akan dipancarkan keluar dari sistem atom dan akan berinteraksi dengan materi disekitarnya (Wardhana, 1996).

2.1.2. Aktivitas

Menurut Susetyo (1988), cacah atom suatu radionuklida bukanlah besaran yang dapat terukur secara langsung. Oleh karena itu didefinisikan suatu besaran yang dapat terukur langsung yaitu aktivitas.

Aktivitas suatu radionuklida pada saat t adalah cacah disintegrasi persatuan waktu yang terjadi pada saat t tersebut. Aktivitas pada saat t biasanya dilambangkan dengan A_t dan tidak lain adalah laju peluruhan radioaktif dN_t/dt , maka aktivitas dapat disajikan menurut persamaan (Beiser, 1991).

$$A_t = -\lambda N_t \quad (5)$$

dengan cara yang sama untuk menurunkan persamaan (3) didapat :

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Secara internasional disepakati suatu satuan aktivitas disebut Becquerel atau Bq.

Satu Becquerel didefinisikan sebagai satu disintegrasi inti persekon (dps).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} \quad (7)$$

Disamping satuan Becquerel, masih dipergunakan satuan lama yang disebut satuan Curie atau Ci.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (8)$$

2.1.3. Waktu Paro ($t_{1/2}$)

Menurut Wiryosimin (1995), waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh suatu unsur radioaktif untuk meluruh sehingga jumlah atom radionuklida padanya menjadi setengah dari jumlah atom radionuklida semula. Bila dinyatakan dalam aktivitas A_t maka waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh suatu unsur radioaktif untuk meluruh sehingga aktivitasnya menjadi setengah aktivitasnya semula. Sehingga dari persamaan (5) dan (6) diperoleh persamaan untuk waktu paro:

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (9)$$

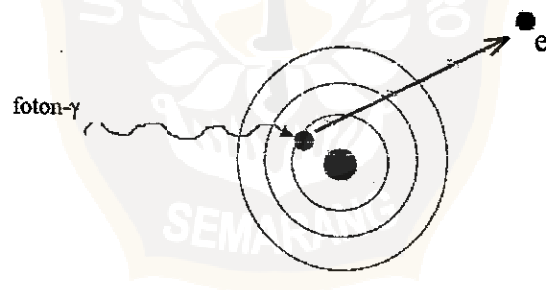
2.2. Interaksi Sinar- γ dengan Materi

Menurut Susetyo (1988), interaksi sinar- γ dengan materi bisa terjadi melalui beberapa kebolehjadian. Interaksi sinar- γ dengan materi, yang dalam hal ini adalah detektor akan menghasilkan spektrum. Ada tiga kebolehjadian interaksi yang penting untuk diperhatikan dalam spektrometri- γ , yaitu :

2.2.1. Efek Fotolistrik

Menurut Susetyo (1988), efek fotolistrik adalah interaksi antara foton- γ dengan sebuah elektron yang terikat kuat dalam atom yaitu elektron bagian dalam suatu atom, biasanya pada kulit K. Elektron orbit dari atom terpengaruh oleh tumbukan foton- γ menjadi elektron bebas. Elektron yang dipancarkan ini disebut fotoelektron. Pada proses ini hampir semua energi foton- γ dipindahkan ke energi elektron, karena energi ikat elektron orbit sangat kecil dibandingkan dengan energi foton- γ , sebagai akibatnya elektron akan dipancarkan keluar dari atom dengan energi gerak hampir sama dengan energi foton- γ yang datang. Persamaan energi gerak fotoelektron (Susetyo, 1988) adalah :

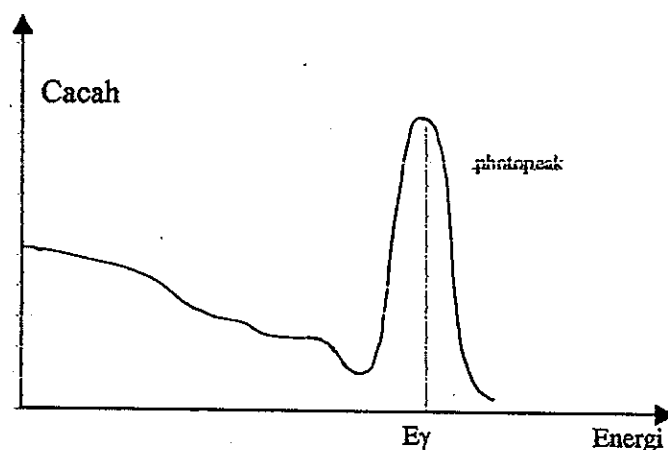
$$E_{ke} = E_{\gamma} - E_i \quad (10)$$



Gambar 2.2. Peristiwa efek fotolistrik (Suratman, 1996).

Fotoelektron yang mempunyai energi gerak inilah yang akan menimbulkan muatan yang akan dicacah sebagai pulsa keluaran detektor yang ditunjukkan dengan munculnya puncak berbentuk fungsi Gauss pada nomor salur

(kanal) yang bersesuaian dengan energi foton- γ datang (E_γ keV). Puncak semacam ini dinamakan sebagai puncak fotolistrik atau “photopeak”.



Gambar 2.3. Spektrum- γ monoenergetik dari efek fotolistrik (Susetyo, 1988).

Arti penting efek fotolistrik dalam spektrometri- γ adalah bahwa foton- γ monoenergetik yang berinteraksi dengan materi (detektor) akan menghasilkan fotoelektron yang monoenergetik pula (Susetyo, 1988).

2.2.2. Hamburan Compton

Sinar- γ menumbuk elektron pada atom bagian luar atau elektron bebas, sehingga elektron terpental menurut sudut- ϕ terhadap arah gerak foton- γ mula-mula tetapi tidak semua energi foton- γ dipindahkan ke elektron, masih dipancarkan foton- γ sesudah tumbukan dengan energi yang lebih rendah.

Persamaan energi foton- γ terhambur (Wiryosimin, 1995) adalah :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma} / m_0 c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (11)$$

dengan :

$E_{\gamma'}$ = Energi foton- γ terhambur (MeV)

E_{γ} = Energi foton- γ mula-mula (MeV)

m_0 = Massa diam elektron ($0,511 \text{ MeV}/c^2$)

c = Laju cahaya dalam hampa ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

θ = Sudut hamburan γ

Berdasarkan hukum kekekalan energi, maka besarnya energi elektron Compton adalah :

$$E_e = E_{\gamma} - E_{\gamma'} \quad (12)$$

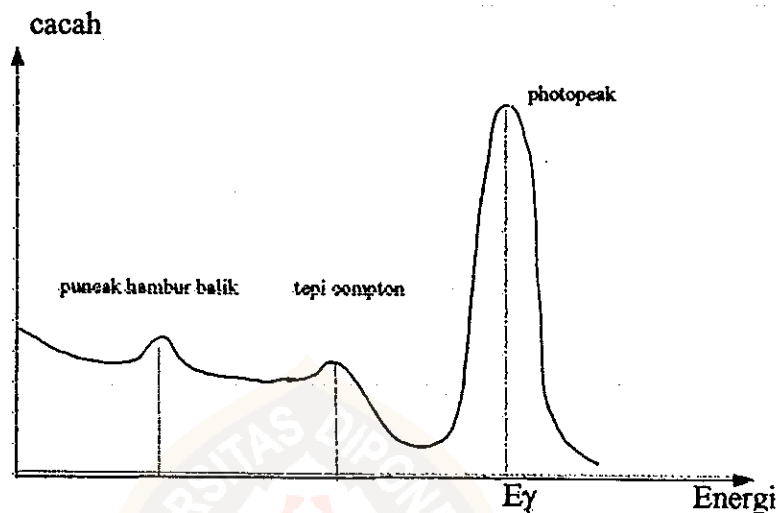
atau dengan substitusi persamaan (11) dan (12) didapat :

$$E_e = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}} \quad (13)$$

Energi elektron Compton dapat bergerak dari nol (untuk $\theta = 0$) sampai ke suatu energi maksimum untuk $\theta = 180^\circ$. Untuk sudut $\theta = 180^\circ$ foton- γ akan kehilangan energi maksimum (atau elektron Compton akan menerima energi maksimum) karena terjadi tumbukan frontal atau hamburan balik. Pada saat itu energi elektron Compton adalah :

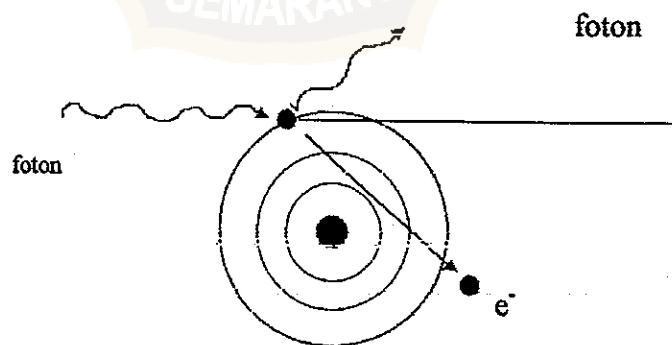
$$E_e = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_{\gamma}}} \quad (14)$$

Hal ini dicerminkan dalam spektrum- γ dimana ditunjukkan suatu agihan Compton yang terbentang dari tenaga nol sampai suatu tenaga maksimum. Batas maksimum tersebut sering disebut sebagai tepi Compton (Compton edge).



Gambar.2.4. Spektrum- γ dari efek Compton (Susetyo, 1988)

Secara sederhana peristiwa hamburan compton digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.5. Peristiwa hamburan Compton (Suratman, 1996)

2.2.3. Produksi Pasangan

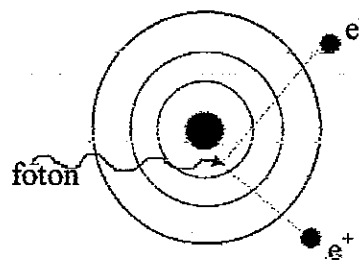
Foton- γ dengan energi yang cukup tinggi bila melewati dekat inti atom, oleh pengaruh medan coulomb inti, dapat menimbulkan proses bentukan pasangan yaitu terjadinya elektron dan positron. Pada proses ini juga harus dipenuhi hukum kekekalan energi (relativistik).

$$E_{\gamma} = m^{+}c^2 + m^{-}c^2 + Ee^{+} + Ee^{-} \quad (15)$$

atau dapat ditulis

$$E_{\gamma} = 2m_0c^2 + Ee^{+} + Ee^{-} \quad (16)$$

Ee^{+} dan Ee^{-} adalah energi gerak positron dan elektron. Positron adalah partikel yang tidak stabil dan mempunyai umur sangat pendek. Segera setelah terbentuk positron akan bergabung dengan elektron disekitarnya setelah menyerahkan energi geraknya. Massa kedua partikel tersebut diubah menjadi dua buah foton yang masing-masing berenergi 0,511 MeV dan dipancarkan pada arah yang bertolak belakang 180^0 satu terhadap yang lain. Peristiwa ini dinamakan proses anihilasi (pemusnahan) dan ditandai dengan tenaga foton 0,511 MeV tersebut. Kedua foton ini dapat berinteraksi lebih lanjut dengan detektor melalui proses fotolistrik maupun hamburan Compton. Peristiwa produksi pasangan digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.6. Peristiwa produksi pasangan (Suratman, 1996).

2.3. Radioaktivitas Lingkungan

Radioaktivitas lingkungan menurut asalnya ada dua macam, yaitu radioaktivitas alam dan radioaktivitas buatan.

2.3.1. Radioaktivitas buatan

Menurut Wardhana (1996), radioaktivitas buatan timbul karena dibuat manusia, antara lain yang berasal dari hasil pembelahan (fisi), reaksi inti, dan debu-debu radioaktif dari hasil ledakan bom nuklir. Sumber radiasi buatan manusia telah banyak digunakan, seperti untuk radioisotop, sinar-x, akselerator bahan bakar nuklir dan lain-lain. Pemakaian radiasi antara lain digunakan untuk keperluan medis, industri atau eksploitasi sumber alam dan untuk keperluan penelitian.

2.3.2. Radioaktivitas alam.

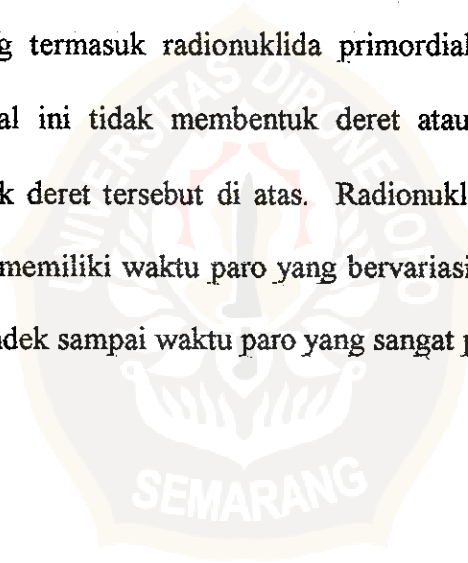
Radioaktivitas alam sudah ada sejak terbentuknya bumi dan alam semesta ini. Radioaktivitas alam ini dapat berasal dari dalam bumi (radiasi dari nuklida primordial) dan dari luar bumi (radiasi dari sinar kosmis). Sumber-sumber radiasi tersebut memancarkan partikel- α , partikel- β , foton- γ , sinar-x dan radiasi neutron (Wardhana, 1994).

a. Radiasi dari dalam bumi (radiasi primordial).

Menurut Wardhana (1996), radiasi primordial adalah radiasi alam yang berasal dari dalam bumi. Radiasi ini berasal dari mineral-mineral radioaktif yang terdapat dalam batu-batuan dan dari dalam tanah.

Mineral dari dalam bumi ini pindah ke permukaan akibat pergeseran kulit bumi (dislokasi), baik karena peristiwa patahan maupun peristiwa vulkanik.

Mineral-mineral radioaktif penyusun batuan (radionuklida primordial) yang ada di alam ini jumlahnya cukup banyak. Dari sekian banyak radionuklida primordial tersebut, ada tiga kelompok yang membentuk deret dari hasil peluruhan induknya, yaitu: deret Uranium ($4n+2$), deret Aktinium ($4n+3$) dan deret Thorium ($4n$). Disamping ketiga kelompok radionuklida primordial tersebut, masih ada beberapa radiasi alam yang lain yang termasuk radionuklida primordial, akan tetapi radionuklida primordial ini tidak membentuk deret atau anak cucu seperti ketiga kelompok deret tersebut di atas. Radionuklida-radionuklida primordial tersebut memiliki waktu paro yang bervariasi, mulai dari waktu paronya yang pendek sampai waktu paro yang sangat panjang.



Tabel 2.1. Beberapa unsur radionuklida primordial (Wardhana, 1996)

Nama Radionuklida	Lambang	Radiasi	Waktu paro (t _{1/2})
Tritium	${}^3_1\text{H}$	β	12,33 tahun
Karbon-14	${}^{14}_6\text{C}$	β	5730 tahun
Plutonium-244	${}^{244}_{94}\text{Pu}$	α	$8,3 \times 10^7$ tahun
Kalium-40	${}^{40}_{19}\text{K}$	β, γ	$1,28 \times 10^9$ tahun
Rubidium-87	${}^{87}_{37}\text{Rb}$	β	$4,9 \times 10^{10}$ tahun
Rhenium-187	${}^{187}_{75}\text{Re}$	β	$5,0 \times 10^{10}$ tahun
Lantanum-138	${}^{138}_{57}\text{La}$	β	$1,05 \times 10^{11}$ tahun
Platinum-190	${}^{190}_{78}\text{Pt}$	α	$6,1 \times 10^{11}$ tahun
Telurium-123	${}^{123}_{52}\text{Te}$	β, γ	$1,2 \times 10^{13}$ tahun
Gedolinium-152	${}^{152}_{64}\text{Gd}$	α	$1,1 \times 10^{14}$ tahun
Indium-115	${}^{115}_{49}\text{In}$	β	$5,0 \times 10^{14}$ tahun
Tantalum-180	${}^{180}_{73}\text{Ta}$	β, γ	$1,6 \times 10^{15}$ tahun
Hafnium-174	${}^{174}_{72}\text{Hf}$	α	$2,0 \times 10^{15}$ tahun
Vanadium-50	${}^{50}_{23}\text{V}$	α, β, γ	$4,0 \times 10^{16}$ tahun
Cerium-142	${}^{142}_{58}\text{Ce}$	α	$5,0 \times 10^{16}$ tahun
Neodymium-145	${}^{145}_{60}\text{Nd}$	α	$1,0 \times 10^{17}$ tahun
Dysprosium-156	${}^{156}_{66}\text{Dy}$	α	$1,0 \times 10^{18}$ tahun

Menurut Wardhana (1996), keberadaan radionuklida primordial diantara satu tempat dengan tempat lainnya tidak sama. Hal tersebut tergantung pada letak geografis suatu tempat serta keadaan geologi tempat tersebut, yang disebabkan mineral-mineral radioaktif yang terdeposit antara satu tempat dengan tempat lainnya berbeda. Oleh karena itu keadaan pasir, tanah dan batuan ikut menentukan radiasi alam tempat tersebut. Seperti contoh beberapa radionuklida primordial yang terdapat pada mineral-mineral yang ada pada pasir dan batuan pada tabel berikut :

Tabel 2.2. Contoh radionuklida primordial yang terdapat pada mineral
(Wardhana, 1996)

Radionuklida Primordial & t _{1/2}	Nuklida turunannya	Terdapat pada mineral (pasir & batuan)
Uranium-238 (Deret Uranium) 4,5 x 10 ⁹ tahun Uranium-235 (Deret Aktinium) 7,1 x 10 ⁸ tahun Kalium-40	Timbal-206 Timbal-207 Argon-40	Zirkon Uraninite Pitchblenda Zirkon Uraninite Pitchblenda Muscovit Biotit Hornblenda Glaucônite Sanidine Batuan vulkanik
Rubidium-87 7,1 x 10 ⁸ tahun	Strontium-87	Muscovit Biotit Lepidolite Microcline Glaucônite Batuan metamorfosis

Dosis radiasi yang diterima dari radionuklida primordial merupakan radiasi latar atau cacah latar (background radiation) yang sering dipakai sebagai data dasar di dalam melakukan AMDAL (Wardhana, 1994).

Tabel mengenai harga pemasukan (intake) tahunan yang diterima manusia dari radionuklida primordial diberikan pada Tabel 2.3.

Tabel.2.3. Pemasukan (intake) tahunan dari radionuklida primordial
(Thayib, 1987)

Sumber	Pemasukan tahunan (Bq)	
	Pernafasan	Makanan
Deret U ²³⁸		
U ²³⁸	1×10^{-2}	5
Th ²³⁰	1×10^{-2}	2
Ra ²²⁶	1×10^{-2}	15
Rn ²²²	2×10^3	300
Pb ²¹⁰	4	40
Deret Th ²³²		
Th ²³²	1×10^{-2}	2
Ra ²²⁸	1×10^{-2}	15
Rn ²²²	1×10^3	-

1 Bq \approx 27 pCi

b. Radiasi sinar kosmis (radiasi kosmogonik).

Menurut Wardhana (1994), radiasi sinar kosmis berasal dari luar atmosfer bumi, yaitu dari energi yang dipancarkan oleh bintang-bintang yang ada di tata surya, termasuk matahari. Matahari mengirimkan zarah-zarah sub atomik ke ruang angkasa. Zarah sub atomik ini yang disebut sinar kosmik primer dan diduga terdiri atas sejumlah proton, elektron dan inti atom. Energi yang dibawa oleh sinar kosmik primer ini berorde 10^7 - 10^{14} keV. Sinar kosmik primer pada saat memasuki atmosfer bumi akan berinteraksi dengan inti dan elektron yang ada di atmosfer sehingga menghasilkan sinar kosmik sekunder. Sinar kosmik sekunder ini terdiri dari meson, proton, neutron, elektron dan foton yang energinya lebih

rendah dari energi sinar kosmis primer. Nuklida-nuklida yang dihasilkan oleh reaksi inti sinar kosmis di ruang angkasa disebut nuklida kosmogonik. Nuklida-nuklida kosmogonik tersebut antara lain H^3 , He^4 , Li^7 , Be^8 , C^{14} , Na^{22} , S^{38} , Cl^{39} dan lain sebagainya.

Daya tembus radiasi sinar kosmis sangat kuat, bisa menembus bahan-bahan bangunan, batu-batuan bahkan dapat menembus bumi sampai kedalaman 200 m. Radiasi sinar kosmis akan selalu tertangkap pada pengukuran intensitas suatu sumber radiasi. Hasil pencacahan yang berasal dari sinar kosmis disebut cacah latar atau background (Wardhana, 1994). Dosis setara efektif tahunan yang diterima manusia yang berasal dari radionuklida kosmogonik disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Dosis ekivalen tahunan dari radionuklida kosmogonik (Thayib, 1987)

Sumber	Dosis (μSv)
H^3	0,01
Be^7	7
C^{14}	12
Na^{22}	0,2

1 $\mu Sv = 10^{-4}$ rem

Dosis radiasi tahunan secara rata-rata yang diterima oleh manusia yang berasal dari radionuklida alam adalah sebagai berikut :

Tabel 2.5. Dosis radiasi tahunan yang diterima manusia rata-rata
(Thayib, 1987)

Sumber radiasi	Dosis setara tahunan (μSv)		
	Radiasi eksternal	Radiasi internal	Total
Radiasi Kosmos			
• Radiasi pengion	240	-	240
• Radiasi neutron	42	-	42
Radionuklida kosmogonik		15	15
Radionuklida primordial			
• K-40	150	180	330
• Rb-87		6	6
Deret U-238			
• U-238 \rightarrow U-234		5	
• Th-230		7	
• Ra-226	100	7	1239
• Rn-222 \rightarrow Po-214		1000	
• Pb-210 \rightarrow Po-210		120	
Deret Th-232			
• Th-232		3	
• Ra-228 \rightarrow Ra-224	160	13	336
• Rn-220 \rightarrow Tl-208		160	
Total	700	1500	2200

1 $\mu\text{Sv} = 10^{-4}$ rem

Sebagaimana diketahui bahwa harga dosis tersebut sangat bervariasi dari tempat ke tempat, yang antara lain bergantung kepada kadar zat radioaktif alam yang terdapat pada tempat tersebut.

2.3.3. Radionuklida primordial sumber air Gunung Ungaran

Batuan merupakan substansi penyusun kerak bumi yang terbentuk dari mineral-mineral yang terdeposit. Deposit mineral terbentuk dengan berbagai cara, salah satunya melalui proses sedimentasi. Sedimen adalah deposit yang diendapkan oleh air (air sungai dan air laut) berupa partikel kasar atau halus seperti batu, pasir dan lumpur. Mineral-mineral yang terdeposit ini terdiri dari unsur logam (Mg^{24} , V^{51} , Cr^{52} , Fe^{56} , Au^{197} , Pt^{195} , dll) dan unsur non logam (U^{238} , Th^{232} , Ra^{226} , dll), sebagian berupa unsur radioaktif dan sebagian lainnya tidak radioaktif (Prawiro, 1988).

Menurut Van Bemmelen (1970) di Gunung Ungaran banyak terdapat batuan jenis andesit hornblenda augit, basal olivin augit, perlit biotit dan batuan vulkanik lainnya.

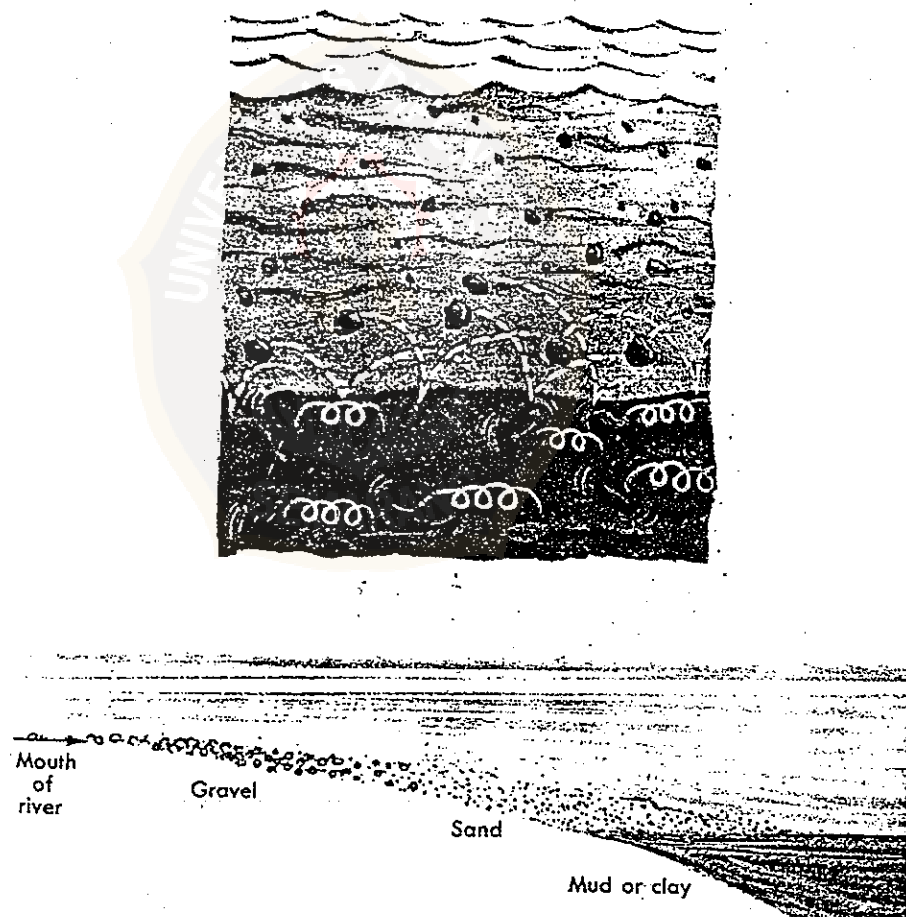
Batuan-batuan jenis hornblenda, augit, olivin, biotit dan batuan vulkanik memiliki komposisi mineral dari unsur-unsur logam Ca, Mg, Fe, Al, Na, Ti, Si dan unsur-unsur non logam Rb, Sr, K, Ar (Sheldon, 1990).

Mineral-mineral tersebut sebagian merupakan radionuklida primordial. Kemudian melalui transport material akan berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya, dengan melalui proses sebagai berikut :

Batuan yang terbentuk dari proses dislokasi kulit bumi membawa mineral-mineral radioaktif mengalami proses pelapukan, baik pelapukan secara kimia maupun pelapukan mekanik. Kemudian terjadi erosi Sungai, glasier, air tanah dan arus laut adalah media yang paling berperan dalam transport material. Pada sungai, material akan terbawa melalui aliran air (arus).

Material-material tersebut pada suatu saat, sebagian akan jatuh ke dasar sungai dan sebagian yang lain akan terlarut dalam air sampai akhirnya menuju lautan. Material yang terjatuh ke dasar sungai akan terdeposit kemudian mengendap dan membentuk sedimen (Sheldon, 1990).

Material yang memiliki ukuran dan massa besar akan jatuh terlebih dahulu ke dasar sungai, kemudian material yang lebih kecil, baru kemudian material yang terkecil, sehingga sedimen yang terbentuk dari hulu sungai sampai muara sungai akan berbeda seperti terlihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Proses sedimentasi dan sedimen yang terbentuk dari transport arus sungai (Thurber and Kilburn, 1965).